

## 分離変換技術開発と核データ研究の展望

# (3) 加速器駆動炉 (ADS) について

深 堀 智 生

日本原子力研究開発機構  
原子力基礎工学研究センター

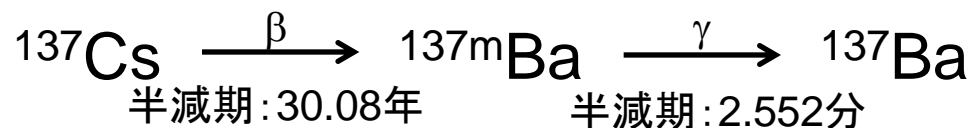
**化学反応**: 反応の前後で物質の化学形態は変わるが、原子は不変



**原子核反応**: 反応の前後で原子が別の原子に変化する

## ①原子核の自発崩壊

不安定な原子核が高エネルギー粒子を放出して自発的に他の核種に変換する(例:  $\alpha$ 崩壊、 $\beta$ 崩壊、 $\gamma$ 崩壊、自発核分裂)



## ②原子核の衝突反応

原子核と粒子、あるいは原子核と原子核の衝突によって起こる反応



## 原子核の変換(核変換)

原子核に働きかけて、異なる元素、核種(同位体)に変換すること。

- ◆ **中性子**を用いる方法 → クーロン反発力が無く、比較的容易に核反応が起こる
  - **中性子捕獲反応** ( $n, \gamma$ ) : 質量数が1増加。引き続き  $\beta$  崩壊が起こることも。
  - 中性子による**核分裂反応** ( $n, f$ ) : 重核の核子の結合エネルギーを解放
  - 非弾性散乱、その他の反応 ( $n, n'$ )、( $n, 2n$ )、( $n, 3n$ ) : 一般に発生確率低い
- ◆  **$\gamma$ 線**を用いる方法 → クーロン反発力は無いが、相互作用しにくい
  - **光核反応** ( $\gamma, n$ ) : 例  ${}^9\text{Be}(\gamma, n){}^8\text{Be}$ 、電子ビームの制動放射による中性子源
  - **光核分裂** ( $\gamma, f$ ) : 放射性廃棄物中の核分裂性物質の定量法として検討
- ◆ **熱核融合**反応による方法 → クーロン反発力が大きく、高密度プラズマが必要
  - **DD反応、DT反応等**。星の生成で重要な役割。
- ◆ **加速粒子(又はRI線源)**による方法 → 粒子を加速し、ターゲットに当てる
  - **陽子、重陽子、 $\alpha$ 粒子等** 例:  ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ 、 ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$ 、 ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$
  - 陽子による**核破碎反応** ターゲット: 鉛、タングステン、ウラン等の重核
  - **重イオン反応** 例:  ${}^{16}\text{O}+{}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{250}\text{Fm}+\dots$

## 核変換の利用

### ◆ エネルギー生産:

- ウラン、プルトニウムの核分裂
- 重水素、三重水素の核融合(将来技術)

### ◆ 核燃料製造:

- ウラン-238の中性子捕獲によるプルトニウム-239の製造 ( $^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ )

### ◆ 工業分野:

- 半導体製造におけるSi中へのP(リン)ドーピング  $^{30}\text{Si}(n,\gamma)^{31}\text{Si} \rightarrow ^{31}\text{P}$

### ◆ 医療分野:

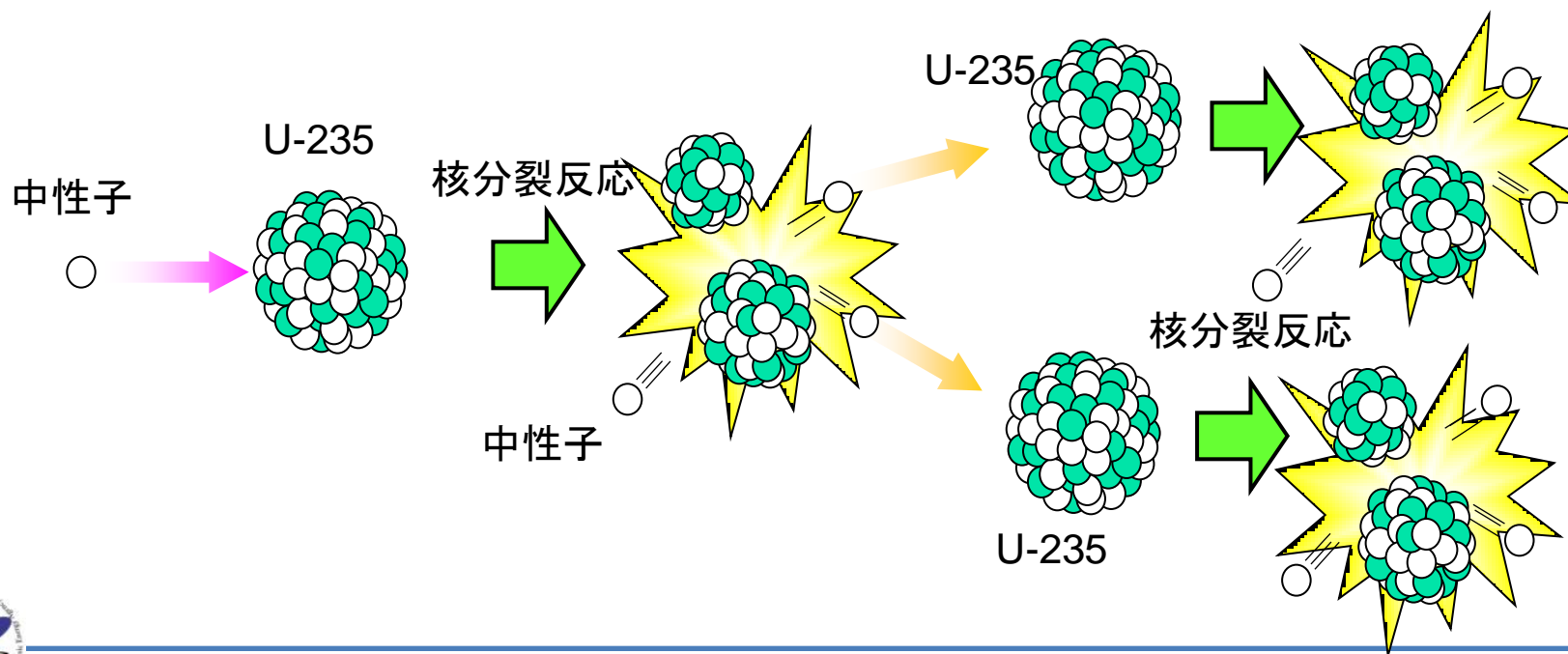
- **ポジトロン断層撮影 (PET)**: 体内に投与した陽電子(ポジトロン)放出核種を利用したガン診断方法。 $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$  (半減期110分)で生成した $^{18}\text{F}$ がよく用いられる。
- **単一光子放射断層撮影(SPECT)**: 体内に投与したガンマ線放出核種を利用したガン診断方法。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (半減期6時間)がよく用いられる。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の親核種である $^{99}\text{Mo}$ の製造 ( $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)$ 、 $^{100}\text{Mo}(n,2n)$ 、 $^{100}\text{Mo}(p,2n)^{99\text{m}}\text{Tc}$ 又は $^{100}\text{Mo}(p,pn)^{99}\text{Mo}$ )
- **ホウ素中性子捕獲療法 (BNCT)**: ガン細胞に集まりやすいホウ素化合物の性質を利用して、中性子照射で $^{10}\text{B}(n,\alpha)$ 反応を局所的に起こす方法

### ◆ 長寿命放射性廃棄物の低減:

- 以下、詳述

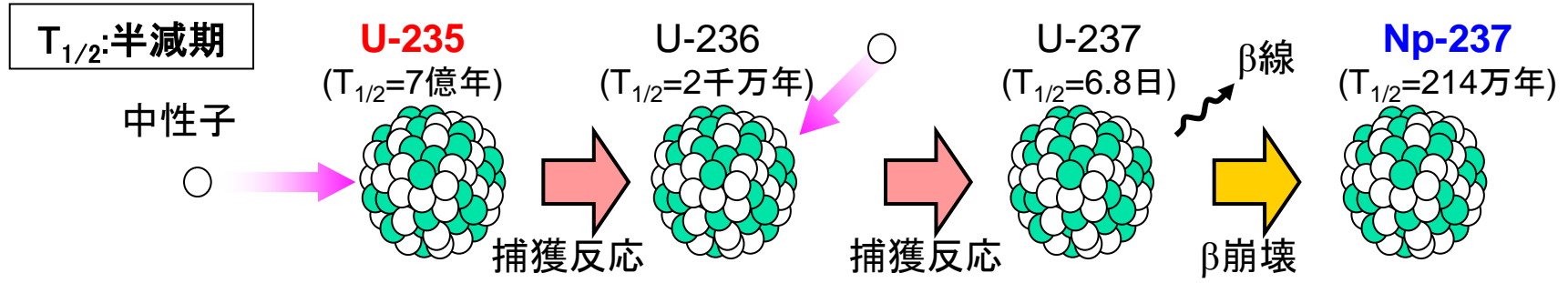
## 核分裂

- 主にウラン235 ( $^{235}\text{U}$ )の核分裂反応
- 1個のウラン原子が、2個の核分裂生成物 (Fission Product: FP)に変化
- 原子核の結合エネルギーの一部が解放されて熱エネルギーに変化
- 余った2~3個の中性子を放出
- 中性子が次のウランに当たって、核分裂を起こす → 連鎖反応
- この間、約0.1マイクロ秒 (高速中性子炉) から0.1ミリ秒 (熱中性子炉)

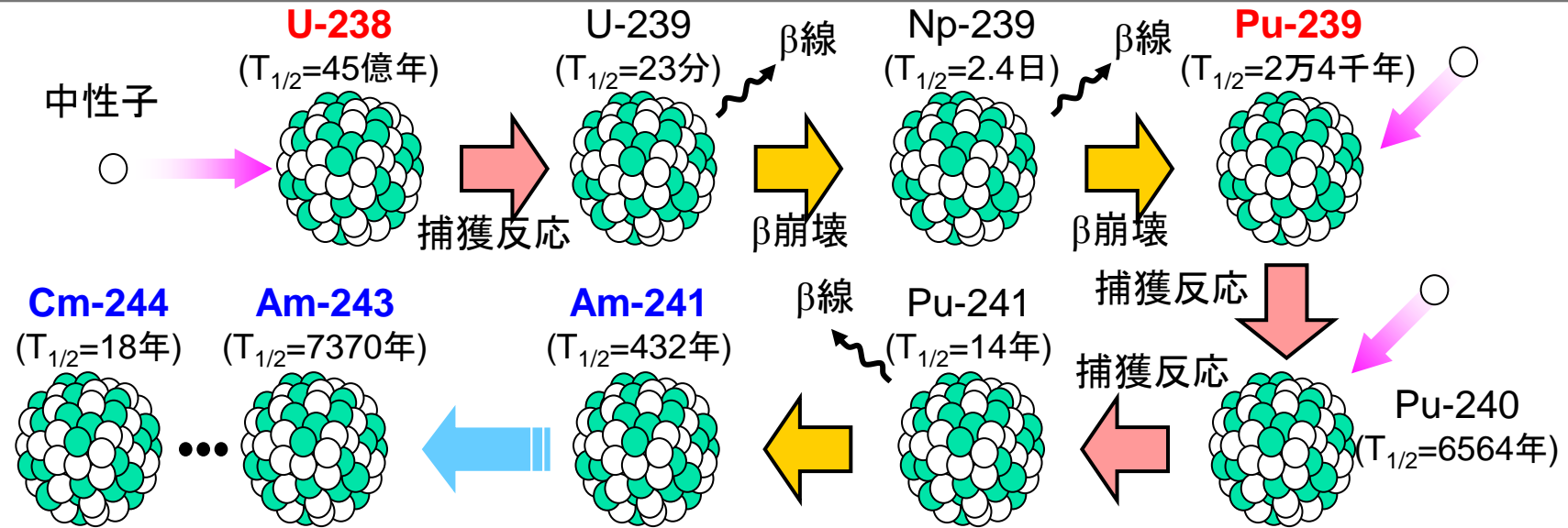


## 中性子捕獲反応

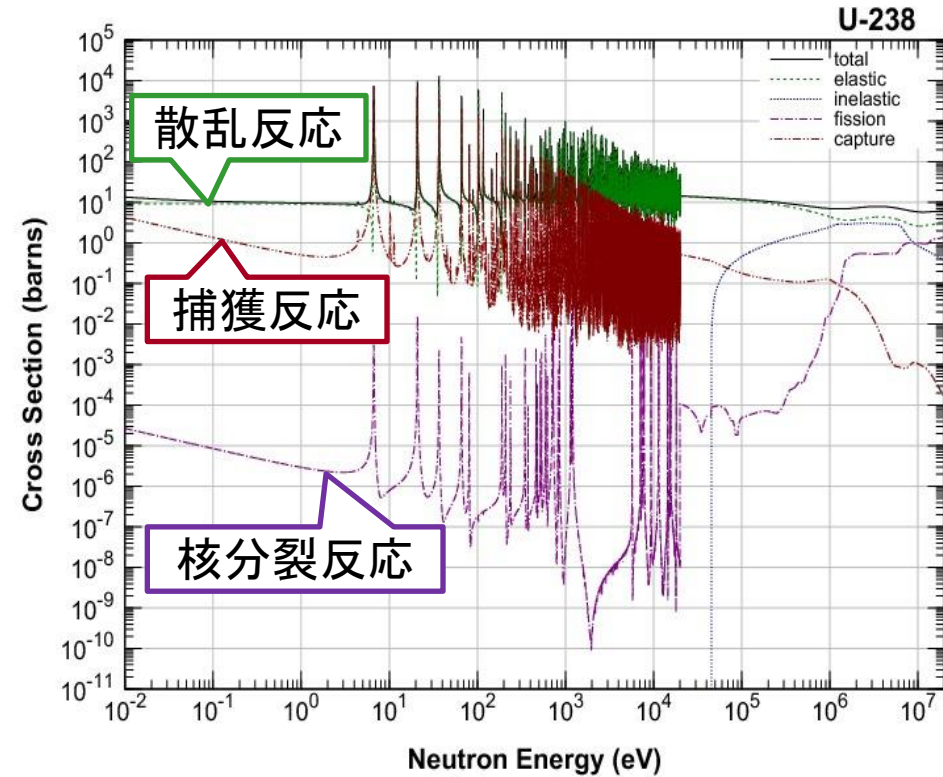
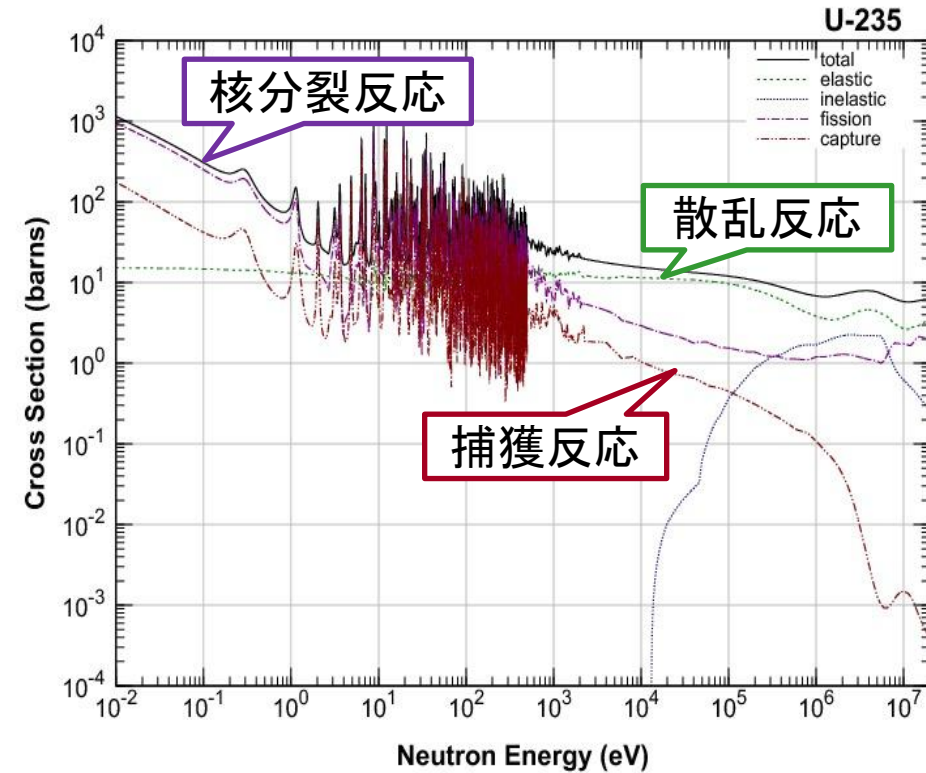
□ **ウラン235 ( $^{235}\text{U}$ ):**天然では0.7%の同位体比 原子炉では3~5%程度に濃縮



□ **ウラン238 ( $^{238}\text{U}$ ):**天然では99.3%の同位対比



## ウラン同位体



### ウラン同位体の天然存在比

$^{238}\text{U}$  ( $T_{1/2}$ : 46.7億年) : 99.2745%

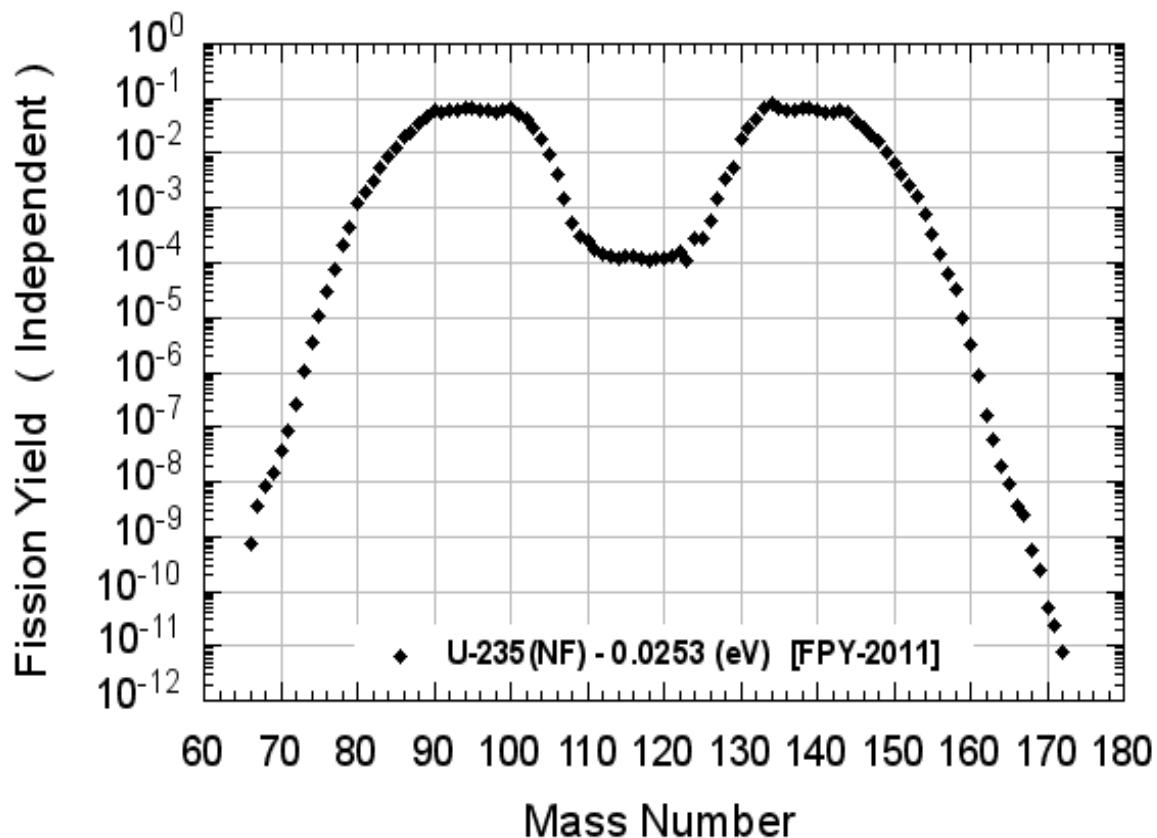
$^{235}\text{U}$  ( $T_{1/2}$ : 7.04億年) : 0.72%

$^{234}\text{U}$  ( $T_{1/2}$ : 24.6万年) : 0.0055%



## 核分裂反応で生成される核種(核分裂収率)

核分裂によって発生する2個の核分裂生成物の質量数分布は非対称  
質量数90~100と130~140くらいにピーク



JAEA Nuclear Data Center

U-235の核分裂で生成される核分裂生成物の質量数分布



## 核分裂生成物(FP)とマイナーアクチノイド(MA)

族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	殻構造							
周期	(1A)	(2A)	(3B)	(4B)	(5B)	(6B)	(7B)	(8)			(1B)	(2B)	(3A)	(4A)	(5A)	(6A)	(7A)	(0)								
1	1H 水素 1.008																		2He ヘリウム 4.003	K殻						
2	3Li リチウム (6.941)	4Be ベリリウム 9.012																		5B ホウ素 10.81	6C 炭素 12.01	7N 窒素 14.01	8O 酸素 16.00	9F フッ素 19.00	10Ne ネオン 20.18	L殻
3	11Na ナトリウム 22.99	12Mg マグネシウム 24.31																		13Al アルミニウム 26.98	14Si ケイ素 28.09	15P リン 30.97	16S 硫黄 32.07	17Cl 塩素 35.45	18Ar アルゴン 39.95	M殻
4	19K カリウム 39.10	20Ca カルシウム 40.08	21Sc スカンジウム 44.96	22Ti チタン 47.87	23V バナジウム 50.94	24Cr クロム 52.00	25Mn マンガン 54.94	26Fe 鉄 55.85	27Co コバルト 58.93	28Ni ニッケル 58.69	29Cu 銅 63.55	30Zn 亜鉛 65.39	31Ga ガリウム 69.72	32Ge ゲルマニウム 72.61	33As ヒ素 74.92	34Se セレン 78.96	35Br 臭素 79.90	36Kr クリプトン 83.80	N殻							
5	37Rb ルビジウム 85.47	38Sr ストロンチウム 87.62	39Y イットリウム 88.91	40Zr ジルコニウム 91.22	41Nb ニオブ 92.91	42Mo モリブデン 95.94	43Tc テクネチウム [99]	44Ru ルテニウム 101.1	45Rh ロジウム 102.9	46Pd パラジウム 106.4	47Ag 銀 107.9	48Cd カドミウム 112.4	49In インジウム 114.8	50Sn スズ 118.7	51Sb アンチモン 121.8	52Te テルル 127.6	53I ヨウ素 126.9	54Xe キセノン 131.3	O殻							
6	55Cs セシウム 132.9	56Ba バリウム 137.3	57~71 ランタノイド *	72Hf ハフニウム 178.5	73Ta タンタル 180.9	74W タングステン 183.8	75Re レニウム 186.2	76Os オスミウム 190.2	77Ir イリジウム 192.2	78Pt 白金 195.1	79Au 金 197.0	80Hg 水銀 200.6	81Tl タリウム 204.4	82Pb 鉛 207.2	83Bi ビスマス 209.0	84Po ポロニウム [210]	85At アスタチン [210]	86Rn ラドン [222]	P殻							
7	87Fr フランシウム [223]	88Ra ラジウム [226]	89~103 アクチノイド **	104Rf ラザホージウム [261]	105Db ドブニウム [262]	106Sg シーボーギウム [263]	107Bh ボヘリウム [264]	108Hs ハッシウム [265]	109Mt マイトネリウム [268]																	
族の一般名	アルカリ金属	アルカリ土類金属	希土類元素	遷移元素の価電子数は、1または2が多い													カルコゲン元素	ハロゲン元素	不活性ガス							
価電数	1	2															3	4	5	6	7	0				
酸化数	+1	+2																+4	-3	-2	-1	0				

**核分裂生成物**

元素記号  
原子番号  
元素名  
原子量

\* 1993年 国際原子量  
[ ] 内の数値は最も安定な同位体の質量数を示す。

**核燃料**

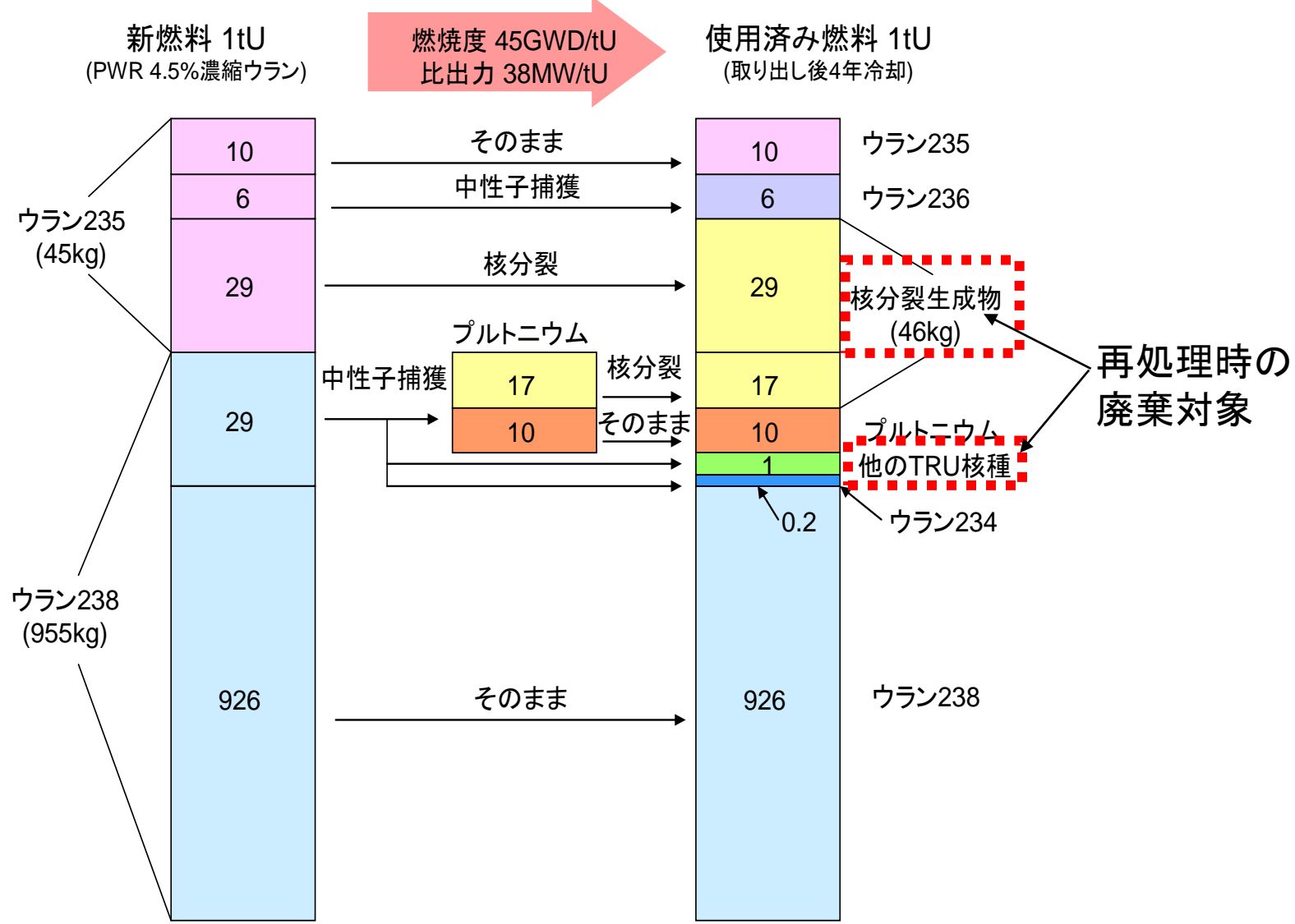
**マイナーアクチノイド**

族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
* ランタノイド	57La ランタン 138.9	58Ce セリウム 140.1	59Pr プラセオジウム 140.9	60Nd ネオジウム 144.2	61Pm プロメチウム [145]	62Sm サマリウム 150.4	63Eu ユウロピウム 152.0	64Gd ガドリニウム 157.3	65Tb テルビウム 158.9	66Dy ジスプロシウム 162.5	67Ho ホルミウム 164.9	68Er エルビウム 167.3	69Tm ツリウム 168.9	70Yb イットルビウム 173.0	71Lu ルテチウム 175.0				
** アクチノイド	89Ac アクチニウム [227]	90Th トリウム 232.0	91Pa プロトアクチニウム 231.0	92U ウラン 238.0	93Np ネプツニウム [237]	94Pu プルトニウム [239]	95Am アメリシウム [243]	96Cm キュリウム [247]	97Bk バークリウム [247]	98Cf カリホルニウム [251]	99Es アインスタイニウム [252]	100Fm フェルミウム [257]	101Md メンデレビウム [258]	102No ノーベリウム [259]	103Lr ローレンシウム [262]				

- 黄色: 非金属元素、他は金属元素
  - 水色: 軽金属
  - 赤色: 遷移金属(B)、他は典型元素(A)
  - 青色: 重金属
  - 黒丸: 常温、常圧で気体
  - 無印: 常温、常圧で固体
  - 星印: 常温、常圧で液体
- 金属元素 = 重金属 + 軽金属

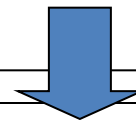


## 原子炉(軽水炉)内でのウラン燃料の転換

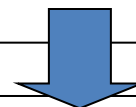


## マイナーアクチノイド核変換専用システム

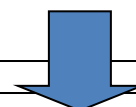
- 高速中性子による核分裂反応を利用。
- 可能な限りMAの濃度を高めて、変換効率を向上させる。
- 多様な燃料組成に対する適応性を高くする。



- ▲ MAを主成分とし、 $^{238}\text{U}$ を含まないため、高速炉の出力上昇を抑制する負のフィードバックで重要な**ドップラー効果**が効きにくい。
- ▲ 炉の安定かつ安全な運転に重要な**実効遅発中性子割合**が小さい。



臨界状態とする通常の原子炉では、運転制御・安全性確保に問題を生じる恐れ有り。



**未臨界で運転する加速器駆動未臨界システム(Accelerator Driven System : ADS)が有力視。**

## なぜADSが必要か？

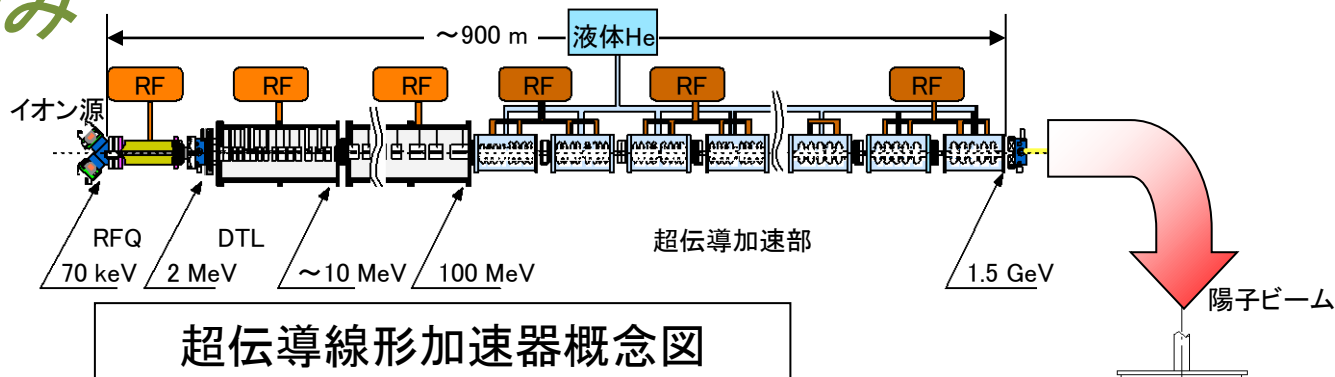
### ■ ADS導入の動機:

- **MA核変換**: ADSは遅発中性子やドップラー効果の影響が小さいため、MAを大量に装荷できる
- **エネルギー生産**: ADSは加速器を止めれば直ちに停止するため、現行軽水炉よりも安全性に優れる可能性がある
- **トリウム利用**: ADSならトリウム未臨界体系からスタートできるため、ウラン資源を必要とせずに原子力利用を始められる
- ◆ 上記の組み合わせも可能

高速中性子増倍体系で、MAの核分裂連鎖反応で効率良く核変換

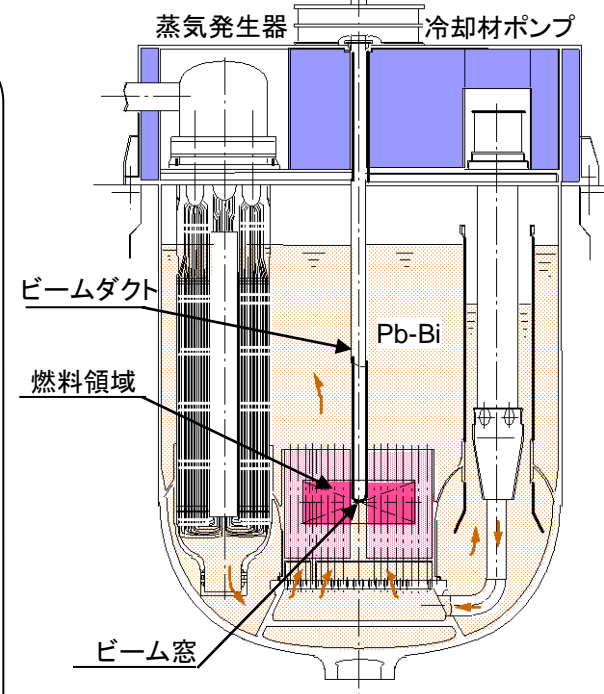
- 例えば、六ヶ所工場(800t/y)で生まれるMA(1~1.5t/y)を核変換するには、3~5GWth程度の総出力規模のADSが必要 → 800MWth × 4~6基

## ADSの仕組み



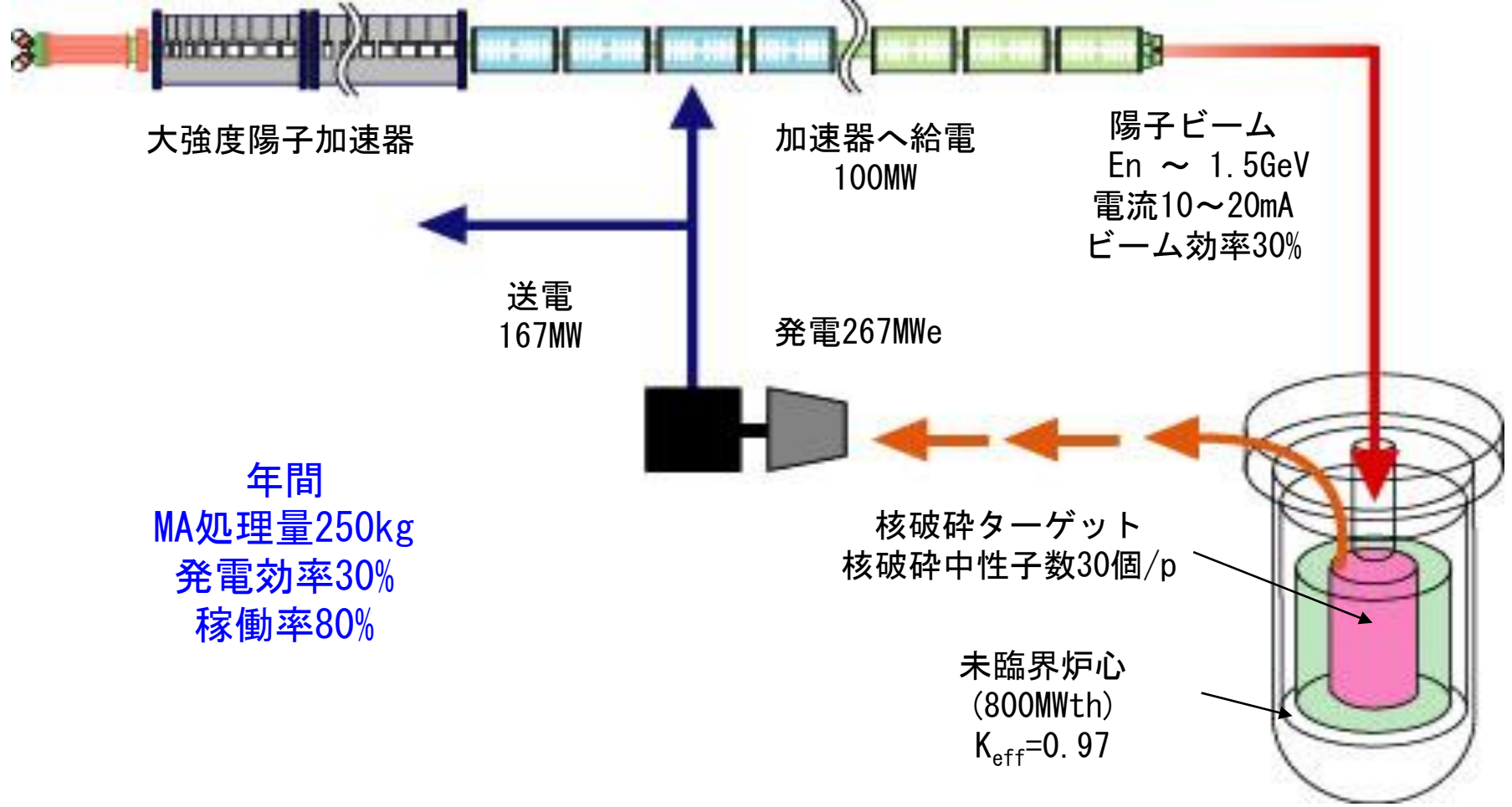
### ADSの仕組み:

- ・超伝導加速器で大強度の陽子を高効率で加速。
- ・陽子はビームダクト・ビーム窓を通して鉛・ビスマス(Pb-Bi)に入射。
- ・Pb-Biは核破砕ターゲットと炉心冷却材を兼ねる。
- ・燃料の主成分はマイナーアクチノイド(MA)。
- ・陽子はPb-Biとの核破砕反応で大量の中性子を発生。
- ・その中性子によりMAを核分裂反応で核変換。
- ・さらに核分裂で発生した中性子も核変換に使用。  
→核分裂の連鎖反応で、1個の中性子を20~30個に増倍。
- ・核分裂で発生する熱で発電し、加速器に供給。



タンク型ADS概念図

## ADSの構成



年間  
MA処理量  $250\text{kg}$   
発電効率  $30\%$   
稼働率  $80\%$



## ADSの構成要素と条件

### ・冷却材の選定

高速中性子体系 → Na, He, Pb, Pb-Bi

→ 第1候補は核破砕ターゲットと同じPb-Bi

**Pb-Bi**: ○温度が上昇したときのボイドによる正の反応度が小さい。

○中性子吸収が小さい。

▲重い ▲Po-210(半減期138dの $\alpha$ 核種)を生成

▲材料共存性に難

◎**ロシアの原子力潜水艦**での経験豊富

### ・未臨界度の設定

→ 万が一の場合でも臨界にならない→臨界より遠い方が良い。

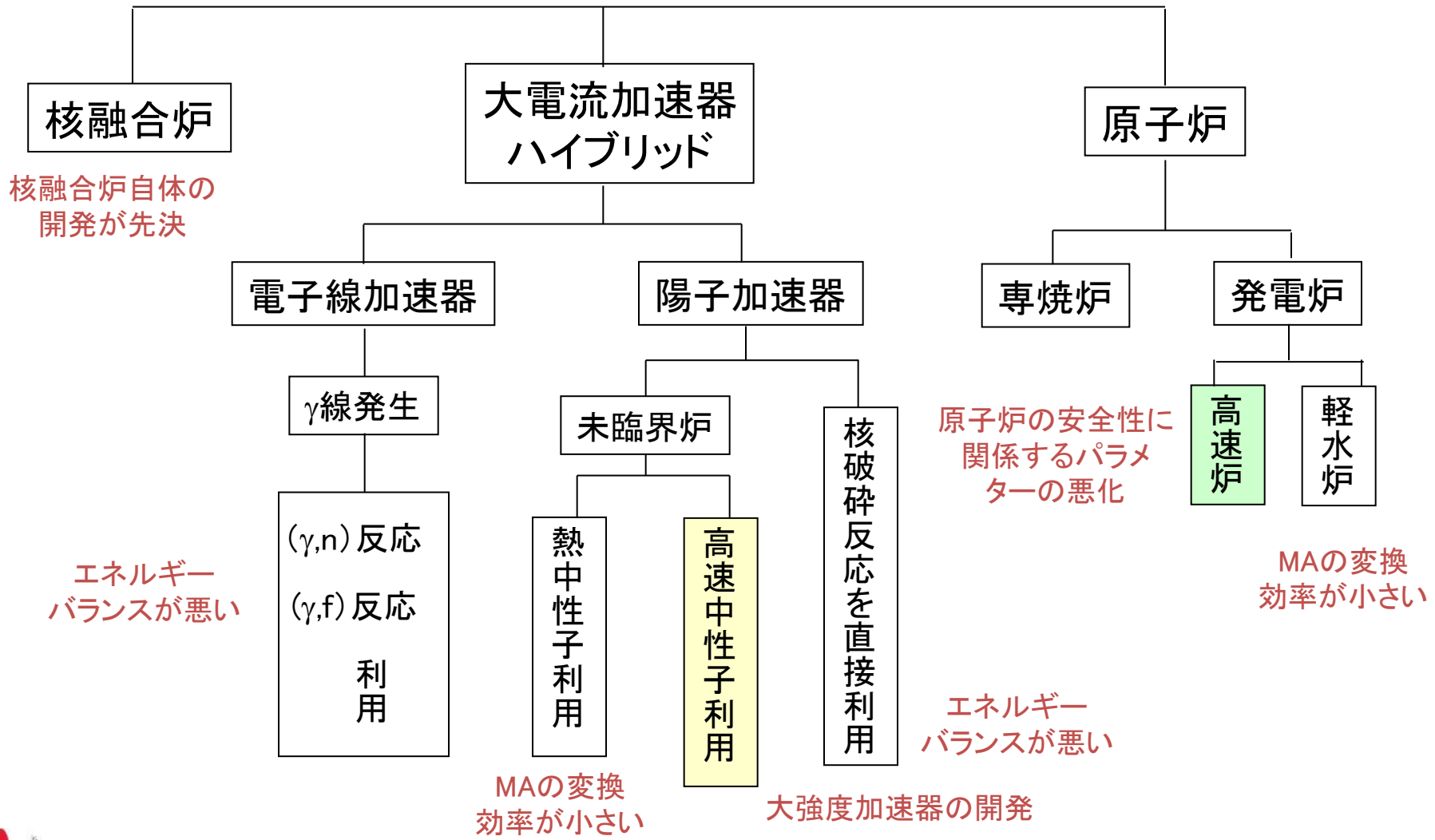
→ 臨界に近い方が加速器が小さくて済む。

→ 燃焼による反応度の変化が小さい方が加速器の出力に余裕を持たなくて寄り小さくて済む。

今後の定量的な評価が必要。



## 提案されている核変換システムの例



## ADSの年間MA処理量

$$M_{\text{ma}} = (I/e) \cdot N_s \cdot \eta \cdot y \cdot (1/(1-k_{\text{eff}})) \cdot (k_{\text{eff}} / \nu) \cdot (A/N)$$

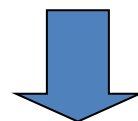
$e$  (素電荷) =  $1.6 \times 10^{-19}$  クーロン

$A$  (MAの質量数) = 約240

$N$  (アボガドロ数) =  $6 \times 10^{23}$

$y$  (1年間) =  $3.15 \times 10^7$  秒

$I$ (電流)	= 約10—20mA
$N_s$ (1陽子あたりの核破砕中性子放出量)	= 約30@1.5GeV
$k_{\text{eff}}$ (中性子増倍率)	= 約0.97
$\nu$ (核分裂による平均放出中性子数)	= 2.9
$\eta$ (陽子加速器の年間稼働率)	= 80%



**MAの処理量(250kg)**

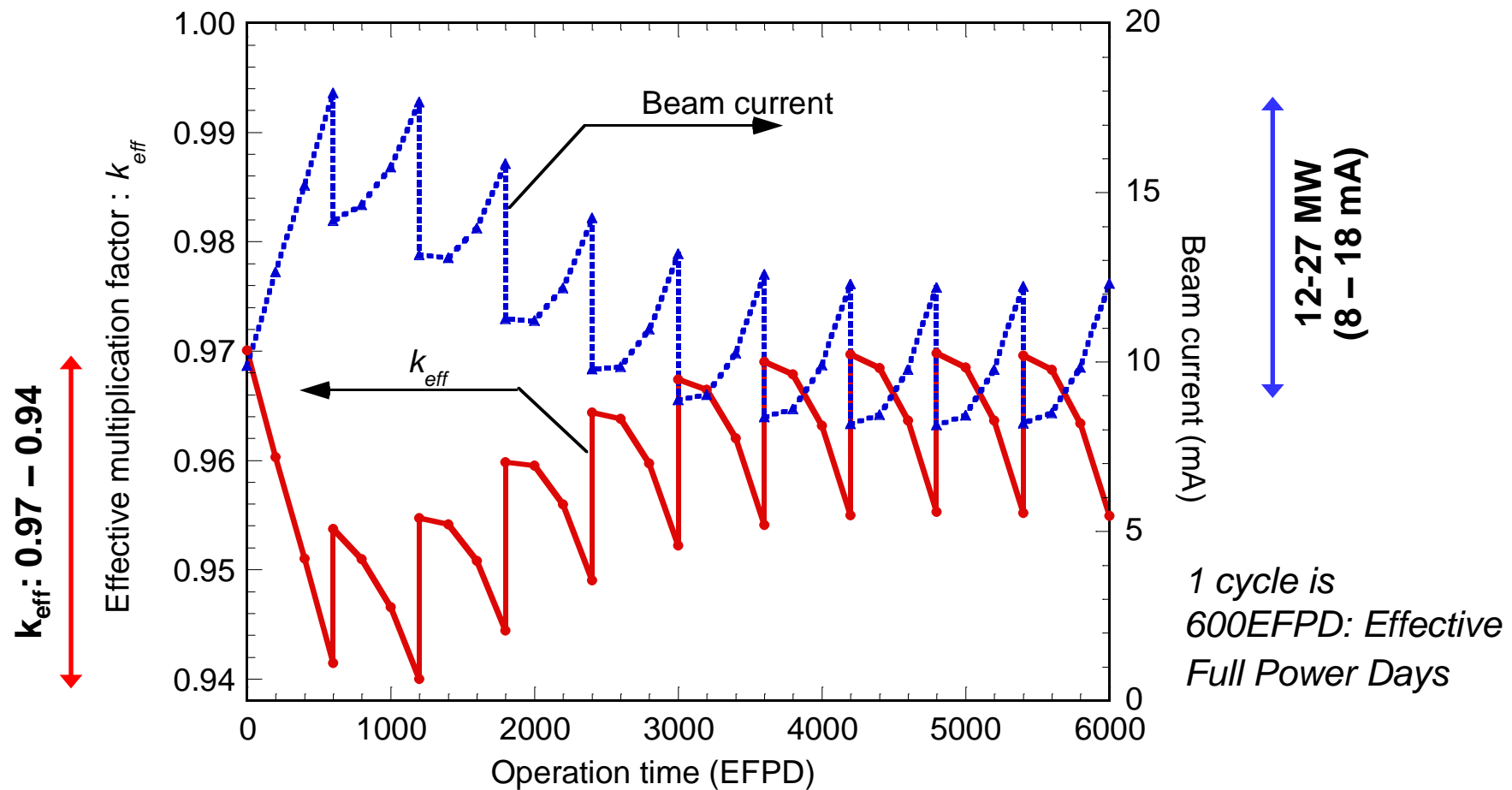
## ADSの加速器条件

- ・強力な中性子源には、高エネルギー陽子(300MeV以上)による**核破碎反応**が最適
- ・加速器に求められる条件 : 大強度、高効率、安定、低コスト  
軽水炉10基分のMAを核変換できる800MWthのADSを  
 $k=0.97$ で運転するには、加速器出力は**20MW**以上必要。  
→ 大電流陽子を高効率で加速 : **超伝導リニアック**

### ・最適な陽子エネルギーの選定:

- 投入エネルギーに対する発生中性子の数 → **1~1.5GeVが最適**
- 実際に、1.5GeV × 13mAか600MeV × 33mAのどちらを選ぶかは、大電流化の困難さ、エネルギーアップによるコスト上昇、ビーム窓の電流密度とビーム径などで総合的に判断する。

## ADSの運転サイクルと未臨界度

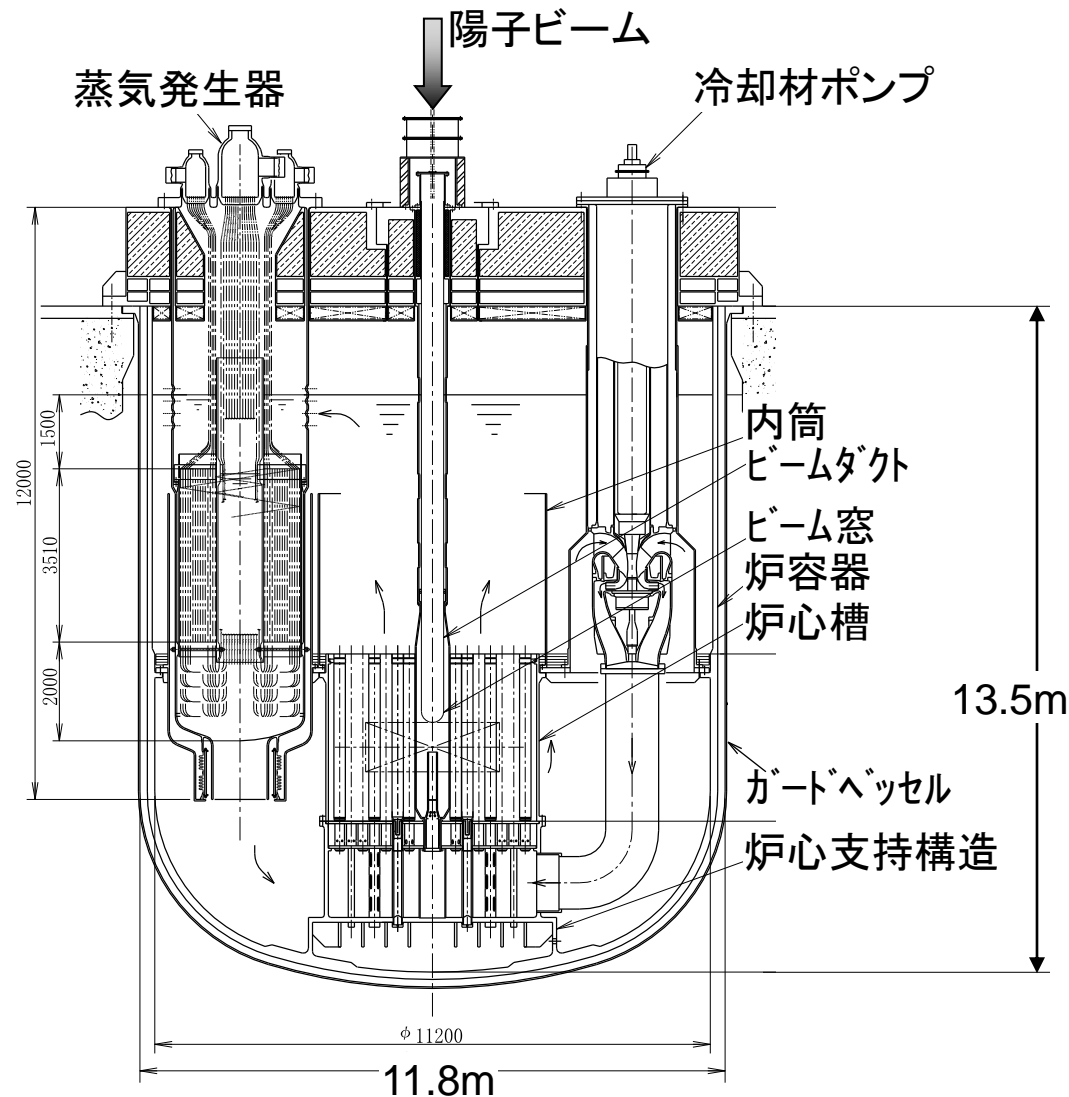


- $k_{eff}: 0.97 - 0.94$  → Maximum beam : 1.5 GeV x 18 mA = 27 MW
- In this study, 30MW is adopted, though 20MW will be sufficient in the equilibrium cycle.



## タンク型鉛ビスマス冷却ADSの概略仕様

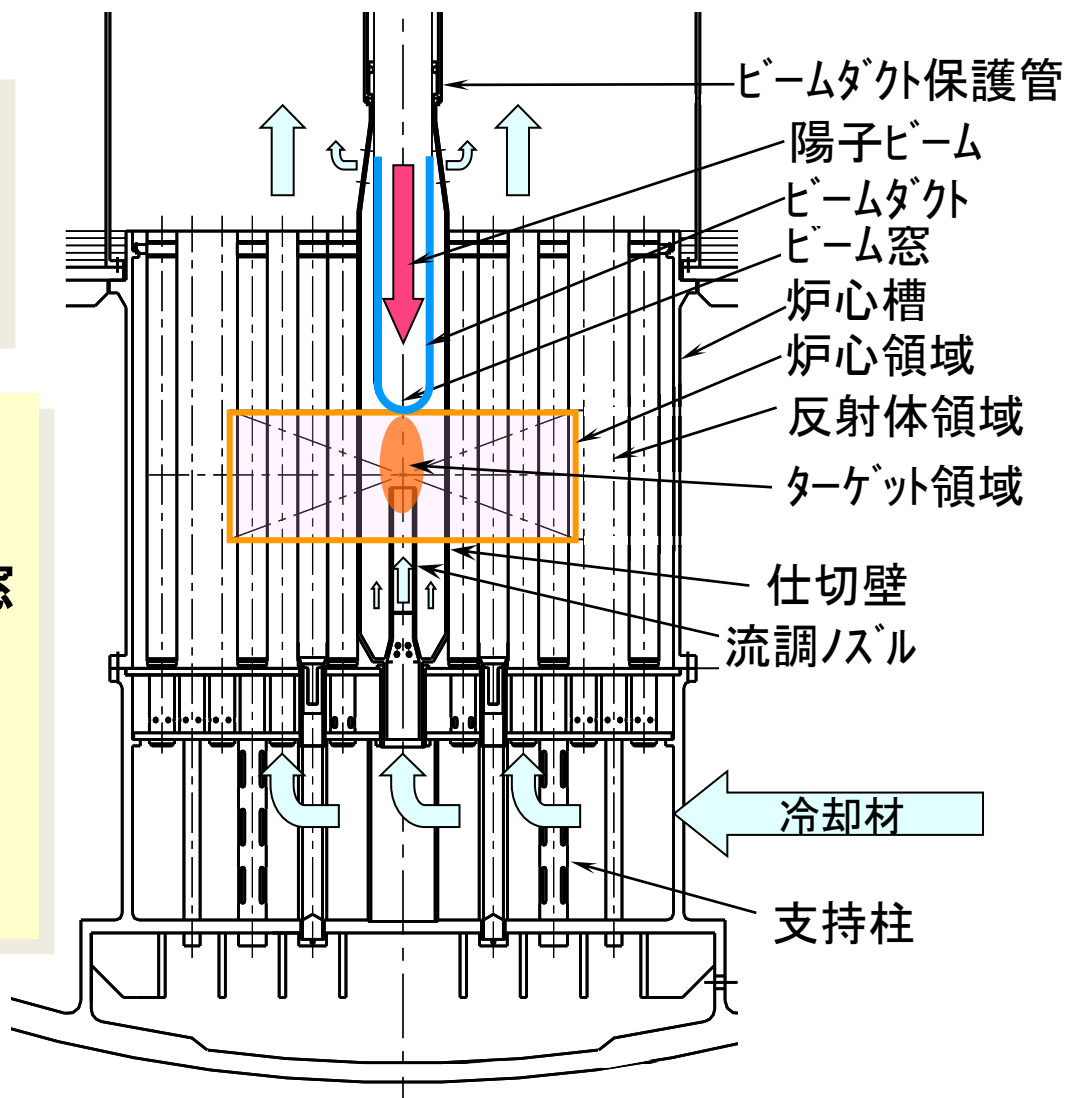
- 陽子ビーム : 1.5GeV
- 核破砕ターゲット : Pb-Bi
- 冷却材 : Pb-Bi
- 最大  $k_{\text{eff}} = 0.97$
- 熱出力 : 800MWt
- MA初期装荷量 : 2.5t
- 燃料組成 :  
 (MA + Pu)N + ZrN  
 内側炉心: Pu/HM=30.0%  
 外側炉心: Pu/HM=48.5%
- 核変換効率 :  
 10%MA / 年
- 燃料交換法 : 600EFPD, 1 バッチ



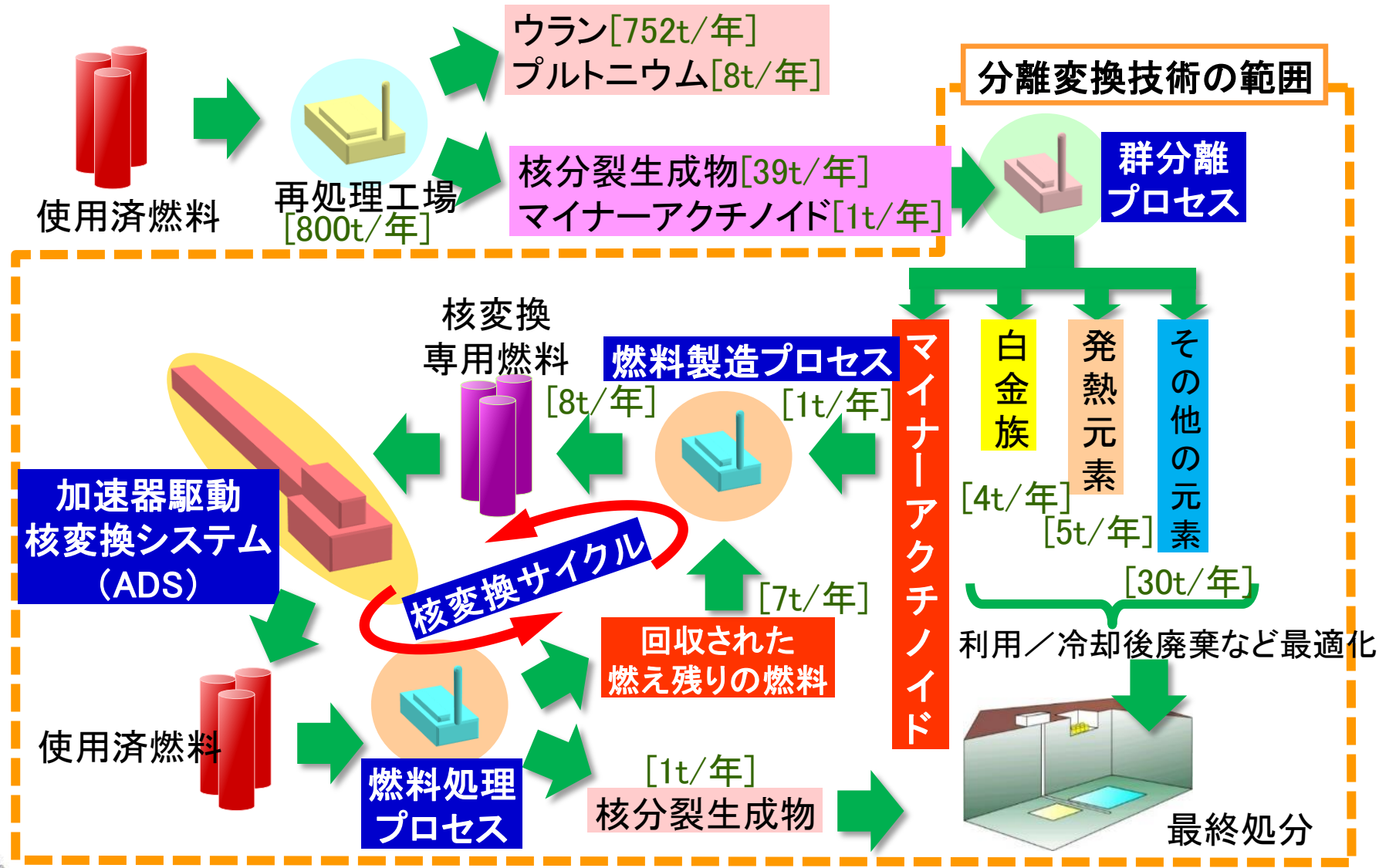
## 鉛ビスマスの流動設計の現状

- 1.5GeV・30MWの陽子で15.7MWの熱が発生
- ビーム窓と炉心ホットスポットの良好な冷却が目標

- 仕切壁でダクトレス集合体からターゲット領域への流入を阻止
- 流調ノズルで高温になるビーム窓先端を効果的に冷却
- 設計パラメータの最適化:
  - 炉心入り口温度 : 300 °C
  - ビームダクト外径 : 45cm



## ADS階層型分離変換サイクルの規模イメージ





## 核変換実験施設 (TEF) の概念

### 核変換物理実験施設: TEF-P

目的： 低出力で未臨界炉心の物理的特性の探索とADSの運転制御経験を蓄積  
施設区分： 原子炉（臨界実験施設）  
陽子ビーム： 400MeV-10W  
熱出力： 500W以下

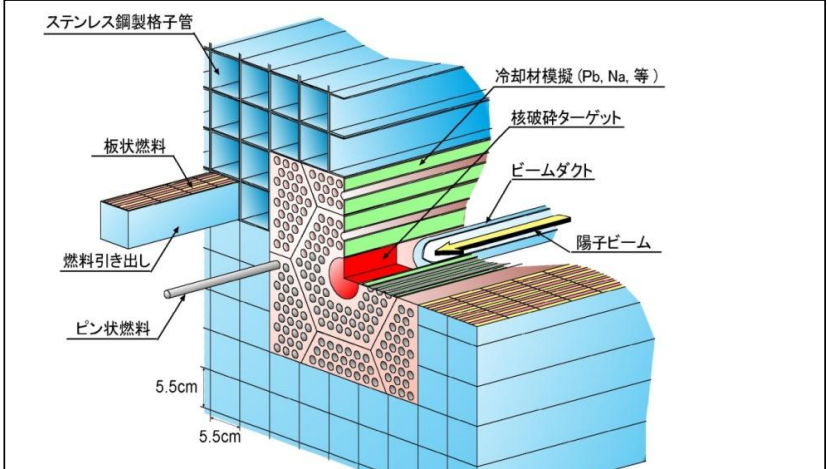
### ADSターゲット試験施設: TEF-T

目的： 大強度陽子ビームでの核破碎ターゲットの技術開発及び材料の研究開発  
施設区分： 放射線発生装置  
陽子ビーム： 400MeV-250kW  
ターゲット： 鉛・ビスマス合金



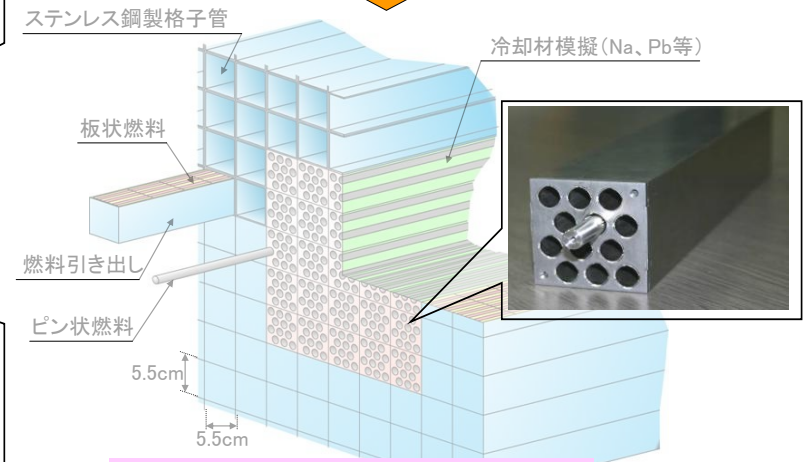
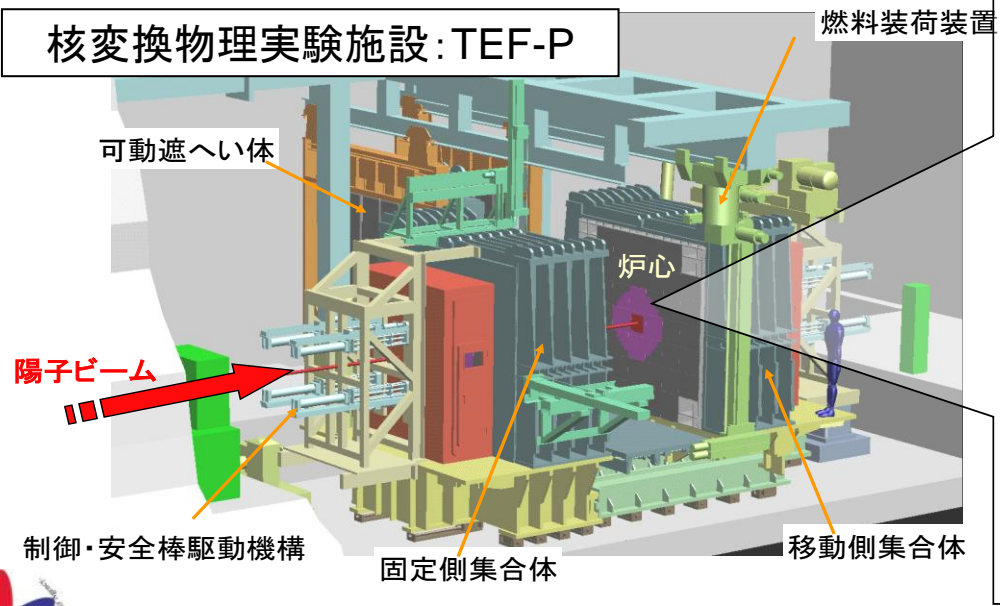
## MA装荷可能な臨界実験装置(1/2)

- 核変換システム特性評価の信頼性向上に資するために、MA装荷実験が可能な高速中性子系臨界実験装置の概念の検討を実施。
- 新規制基準を考慮した施設設計や要素技術開発(MA燃料取扱装置のモックアップ試作)を実施中。



「陽子導入未臨界運転」でのADS模擬実験

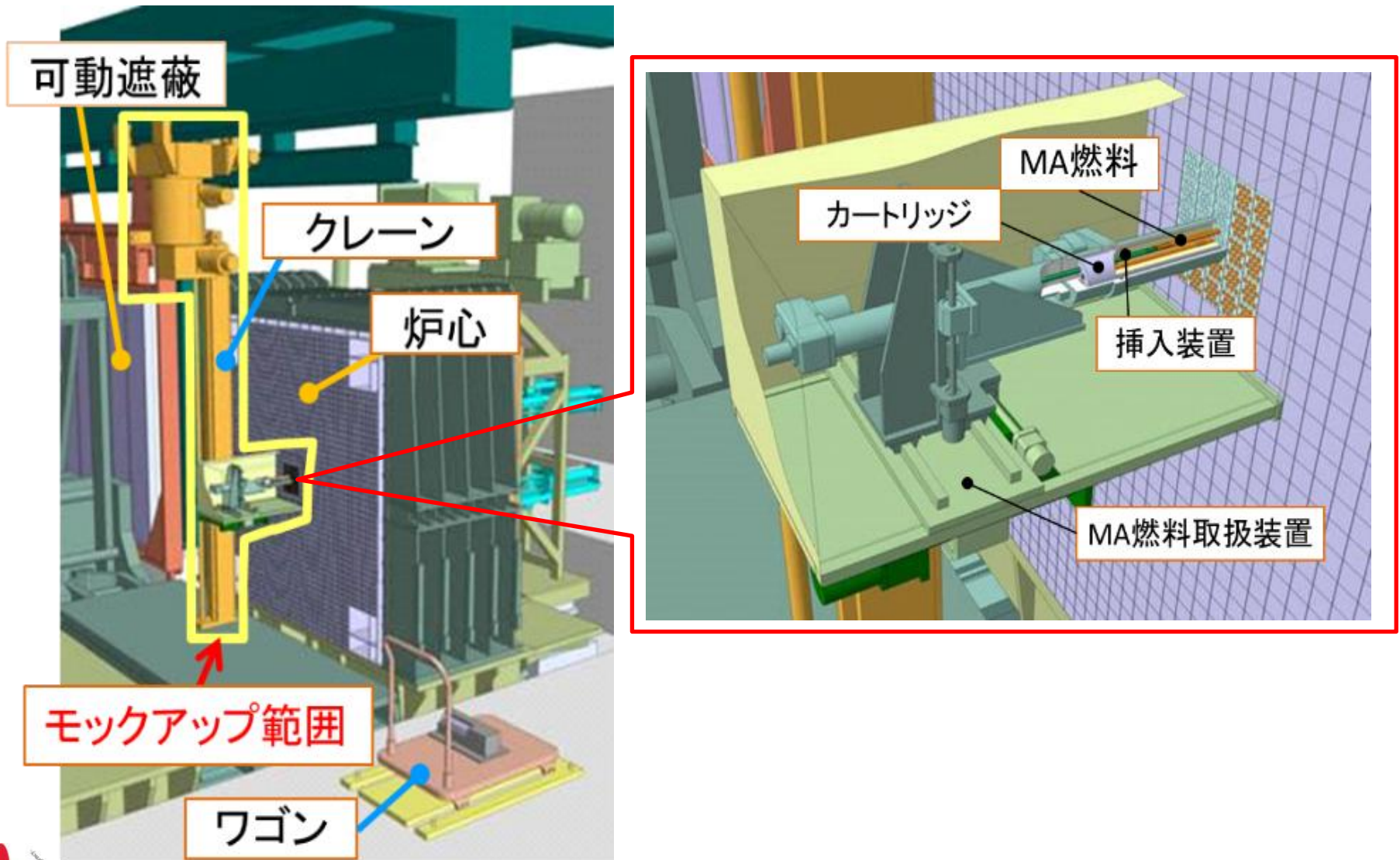
⇕ 柔軟に対応可能



「臨界運転」でのFBR模擬実験



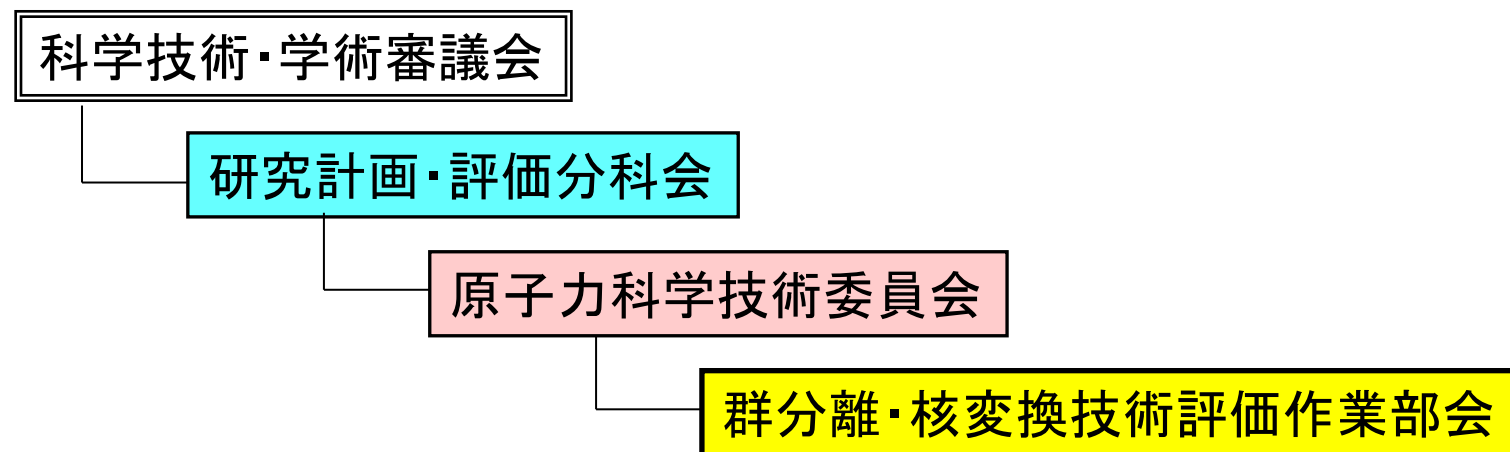
## MA装荷可能な臨界実験装置(2/2)



## 分離変換技術に対する文部科学省における評価

平成25年7月 : 原子力科学技術委員会に、**群分離・核変換技術評価作業部会**を設置

平成25年10月: 中間取りまとめ案を公表



### 評価作業部会の目的

これまで実験室レベルにとどまっていた群分離技術及び加速器駆動核変換システム(ADS)を用いた核変換技術について、(中略)研究開発の進捗状況や、工学規模での研究開発を可能とする出力規模の高い核変換実験施設の整備の必要性や有効性、整備計画の妥当性等を中心に検討。

## H25年度の分離変換技術に対する評価

### 研究開発の課題と今後の取組に関する評価

- 群分離、ADS、燃料サイクル及び燃料の各分野について技術成熟度の検討を行った結果、概ね、概念開発段階から原理実証段階に移行することが可能な研究開発段階にあり、工学規模の次のステージに移行することが適当である。
- J-PARCの核変換実験施設については、次のステージに向けて進むことが適当と考えるが、今後、施設整備計画の策定に当たっては、(中略)段階に応じて進捗状況をチェックすることが必要。

## 作業部会H26年度の見解

### 「核変換実験施設の技術課題進捗に係る見解について」

- 核変換実験施設の課題への取組状況は概ね順調であると判断する。
- また、技術開発に関するロードマップにより技術開発の進捗管理が適切に行われている。
- よって、引き続き、課題達成に向けた要素技術の研究開発に取り組むとともに、施設の建設に向けた検討に必要な地盤調査や施設の安全設計のための検討等に取り組むことは妥当である。
- (中略) 本作業部会としては、これらの進捗状況について、必要に応じて報告を受けるとともに、技術評価について、引き続き、調査、検討を行っていく。

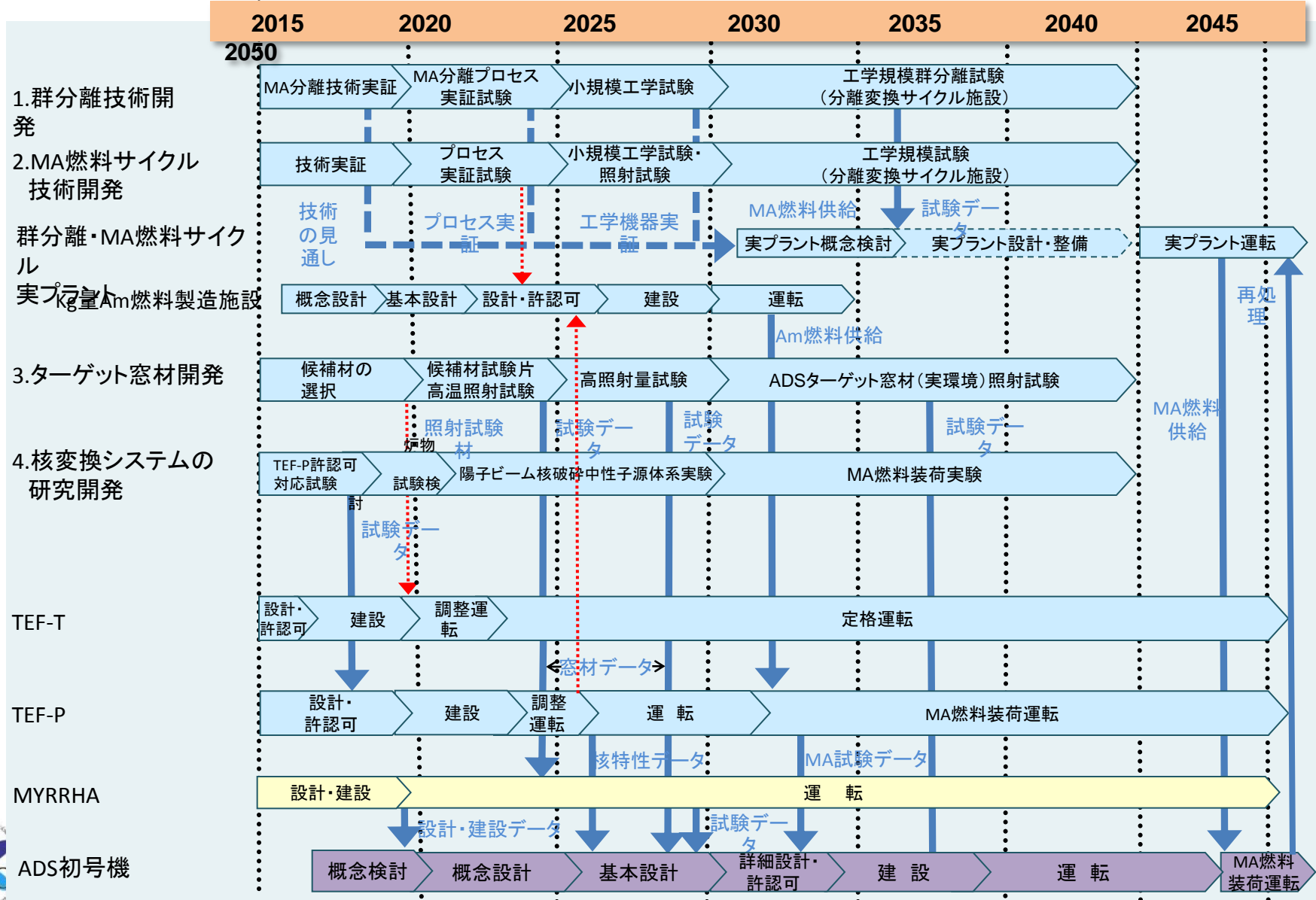
## エネルギー基本計画(平成26年4月)

### 第3章、第4節、4. (1)使用済燃料問題の解決に向けた取組の抜本強化と総合的な推進 ③放射性廃棄物の減容化・有害度低減のための技術開発

- (中略)リスク低減のため、その**減容化・有害度低減が重要であること**等を十分に考慮して対応を進める必要がある。
- こうした課題に的確に対応し、その安全性、信頼性、効率性等を高める技術を開発することは、将来、使用済燃料の対策の柱の一つとなり得る可能性があり、その推進は、**幅広い選択肢を確保**する観点から、重要な意義を有する。
- このため、放射性廃棄物を適切に処理・処分し、その減容化・有害度低減のための技術開発を推進する。
- 具体的には、**高速炉や、加速器を用いた核種変換など、放射性廃棄物中に長期に残留する放射線量を少なくし、放射性廃棄物の処理・処分の安全性を高める技術等の開発を国際的なネットワークを活用しつつ推進する。(後略)**



## 分離変換研究開発ロードマップ



## MYRRHA計画(ベルギー)の概要

### 欧州を中心とした国際協力による加速器駆動多目的研究炉計画

#### □ 目的

- 核廃棄物の核変換技術の開発
- 先進的な原子炉(特に鉛冷却炉)の開発
- 核分裂炉及び核融合炉のための高速中性子照射施設
- 加速器に基づく科学コミュニティへの貢献
- Si照射やRI製造のための中性子照射施設

#### □ 仕様

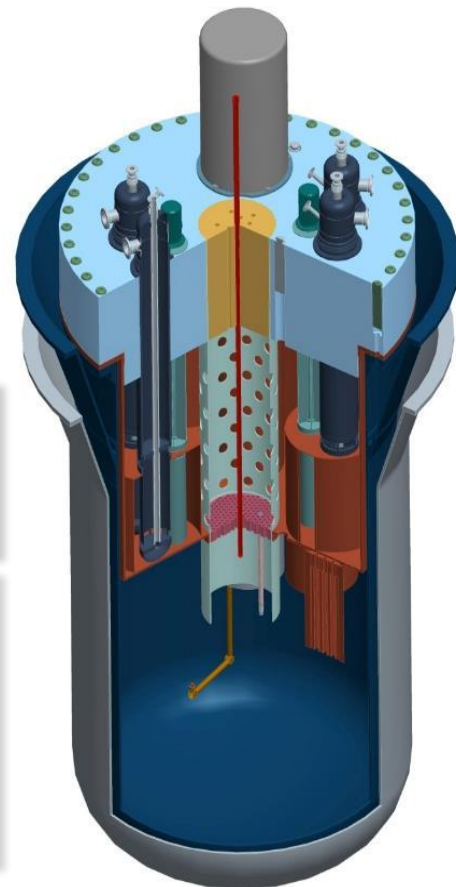
- 加速器: 超伝導LINAC
- 陽子ビーム: 600 MeV – 4 mA
- 核破砕ターゲット・冷却材: Pb-Bi
- 最大  $k_{\text{eff}} = 0.9552$  ( $k_s=0.96$ )
- 熱出力:  $\sim 100\text{MWth}$
- 燃料組成: MOX(富化度30wt%)
- 臨界での運転も可能な概念に変更中
- 窓なし型ターゲット概念を追求していたが、最近、窓あり概念に変更

• 照射炉BR2の後継として、2016年頃の着工を目指している

- 2006年11月に原子力機構と協力取り決め締結
- 2010年から原子力機構は欧州の「中央設計チーム(CDT)」に参加

□ 2010年3月 ベルギー政府がサポートを表明

- 建設費960Mユーロのうち40%を負担



MYRRHA: Multipurpose hYbrid  
Research Reactor for High-tech  
Applications